

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПЕРЕРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Развитие космической горно-перерабатывающей отрасли подразумевает добычу полезных ископаемых и их переработку непосредственно на природных космических объектах. Это приведёт к сокращению затрат по выводу на околоземную орбиту ресурсов, необходимых для обеспечения функционирования космической группировки и освоения дальнего космоса. Основной мировой тренд связан с ростом способов добычи воды на природных космических объектах в целях получения дешёвого водородного топлива и криогенных компонентов. В работе рассматривается проблема синтезирования земных аналогов горных пород, обладающих свойствами, близкими к горным породам природных космических объектов. Отмечена перспективность направления развития «сухих» методов переработки космического минерального сырья.

Ключевые слова: топливо, космос, переработка, обогащение, технология, вода, образцы-аналоги.

Формирование космической горно-перерабатывающей отрасли (КГПО) подразумевает создание системы производств, ориентированных на добычу полезных ископаемых на природных космических объектах с последующей их переработкой и использованием в космосе. Целесообразность доставки полезных ископаемых на Землю при добыче их на природных космических объектах сомнительна, за исключением весьма специфических веществ, таких как гелий-3, металлы платиновой группы и др.

Перспективы развития КГПО будут определяться объективной потребностью космической отрасли, в том числе частных компаний, в продукции, полученной из сырья природных космических объектов. Рационально развивать технологии по добыче и переработке сырья для получения строительных материалов и топлива непосредственно в космосе. В первую очередь, это имеет отношение к добыче воды и получению водородного топлива. Далее потребуются материалы для обеспечения орбитальных сервисных станций и строительства орбитальных и напланетных станций.

На реализацию проекта КГПО, начиная от формирования концепции и заканчивая созданием образцов техники, может потребоваться от пяти до 15 лет. Техническая проблематика КГПО заключается не только в сложности создания технологической части космической техники, но и отсутствии чётких критериев, касающихся технических требований к технологии и оборудованию КГПО. В связи со сложностью использования типовых схем обогащения на основе традиционного принципа «руда–вода» исключаются основные технологические операции из перечня рассматриваемых применительно к горному космическому делу. Вода является стратегическим и труд-



РУДЫ
и
МЕТАЛЛЫ

Ананьев Павел Петрович

кандидат технических наук
генеральный директор
cigt@mail.ru

НП «Научно-образовательный центр
«Инновационные горные технологии»,
г. Москва

Мещеряков Роман Валерьевич

доктор технических наук
профессор, проректор
по научной работе и инновациям
trv@tusur.ru

ФГБОУ ВО «Томский государственный
университет систем управления
и радиоэлектроники»,
г. Томск

Ларионов Павел Вениаминович

старший научный сотрудник
LarionovPV@inbox.ru

ООО «ГАН»,
г. Москва

Плотникова Анна Валериевна

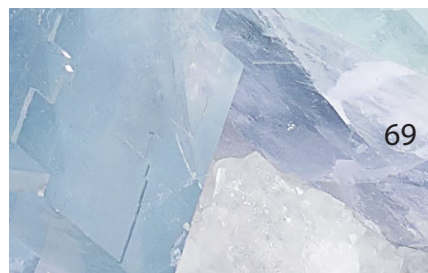
старший преподаватель
МГИ Национального исследовательского
технологического университета МИСиС,
директор ООО «ГАН»,
plotnikovaav@inbox.ru

г. Москва

Беляков Константин Олегович

вице-президент
по стратегическому развитию
Konstantin.Belyakov@elecard.ru

Группа компаний «Элекард»,
г. Москва



но извлекаемым ресурсом. Использование её в технологических процессах переработки и обогащения полезных ископаемых нецелесообразно. Для решения задач по обогащению необходимо использовать «сухие» технологии или разрабатывать принципиально новые способы добычи и обогащения. Западные государственные и частные компании активно ведут фундаментальные и прикладные исследования в этом направлении. Приведём несколько цифр и фактов, отражающих общие тенденции.

В настоящий момент объём мирового рынка космических работ и услуг составляет более 300 млрд долл. США, из них >70% приходится на частные компании. Объём рынка к 2030 г. оценивается в 1,5 трлн долл. США. Большая часть рынка космической отрасли будет приходиться на обслуживание космических аппаратов за счёт развитой орбитальной группировки, при этом доля услуг по доставке груза на орбиту составит не более 2% [12].

В рамках деятельности NASA в 2011 и 2014 гг. уже проводились тренировочные миссии по дозаправке спутников [1]. В программе NASA «Asteroid Redirect Mission» планируется отколоть от астероида большой кусок вещества для его изучения и добычи полезных материалов. При поддержке NASA разработан и проходит испытания робот-погрузчик RASSOR Excavator'у, предназначенный для экскавации лунного грунта в целях дальнейшего извлечения из него воды. Компания Shackleton Energy Company (SEC) рассматривает варианты по созданию первой оперативной базы для добычи льда на Луне в целях производства из него топлива. Список компаний, занимающихся проблематикой освоения сырьевых космических ресурсов, можно продолжить, но это не входит в задачи данной работы.

При решении технологических задач добычи и переработки минерального сырья в земных условиях сложился традиционный алгоритм, оправдавший себя за многие десятилетия. Он включает следующий необходимый набор действий: геологоразведочные работы на рудопроявлениях и месторождениях, отбор технологических проб для изучения вещественного состава, структурных особенностей, физико-механических и технологических свойств руд и определения технологии и показателей их переработки.

Применительно к изучению космического минерального сырья целесообразно изменить последовательность действий, уделив главное внимание разработке технологии синтеза образцов-аналогов космических горных пород с широким диапазоном физико-механических и технологических свойств. Это позволит ускорить решение задачи разработки и апробации новых технологий и оборудования для добычи и переработки космического минерального сырья.

При разработке технологии синтеза всего многообразия видов-аналогов космических горных пород необходимо использовать известные неполные данные о вещественном и минеральном составе, наличии значительного поверхностного электрического заряда на минеральных частицах.

Поверхность Луны покрыта реголитом – рыхлым обломочным материалом, который сформировался в основном под действием метеоритной бомбардировки. Он состоит из угловатых частиц магматических пород типа базальтов и оплавленных, похожих на стеклянные и металлические капли. По данным [1, 2, 4, 14, 15, 17, 18, 21], были составлены таблицы химического состава лунного грунта (табл. 1), физико-механических свойств реголита Луны и Марса и их земных аналогов (табл. 2). В лунном реголите обнаружены редкоземельные металлы, в том числе в самородной форме. Кроме того, в нём содержатся уникальные металлические соединения, не характерные для земных естественных условий, и редкий изотоп гелий-3, имеющий важное значение для развития ядерной энергетики будущего [22].

Первостепенное значение имеет наличие воды. Вода на поверхности Луны находится как в молекулярном состоянии (H_2O), так и в виде гидроксильных соединений (ОН). В лунном грунте в основном присутствует физически и химически связанная вода, что накладывает дополнительные требования к временным и энергетическим параметрам при создании технологии извлечения воды нагревом. Следует учесть, что свойства и структура космического льда могут существенно отличаться от земного аналога (табл. 3) [8]. Модификации льда образуются в условиях низких температур и высоких давлений, за исключением льда первой модификации (земные условия). Такие условия напомина-

1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОБРАЗЦОВ ЛУННОГО ГРУНТА

Оксиды	Лунные породы				Земные породы			
	«Морские» районы		«Материковые» районы		Базальт	Габбро-диабаз	Дунит	Гранит
	Луна-16	Аполлон-15	Луна-20	Аполлон-17				
SiO ₂	42,9	45,0	44,2	48,5	47,0	45,0	40,5	72,2
TiO	5,5	2,5	0,3	0,9	1,8	2,5	-	0,2
Al ₂ O ₃	13,9	8,9	19,1	17,2	14,5	11,8	0,8	13,4
FeO	20,2	22,2	6,9	14,4	7,3	1,8	5,5	0,6
MgO	6,0	9,1	13,4	8,9	7,7	0,2	0,2	0,6
CaO	10,8	10,3	13,3	11,6	10,0	4,5	0,7	2,2
Na ₂ O	0,2	0,3	0,5	0,4	1,6	2,0	0,1	3,0
K ₂ O	0,2	-	0,5	0,3	1,1	1,3	-	4,5

2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕГОЛИТА ЛУНЫ, МАРСА И ЗЕМНЫХ АНАЛОГОВ

Параметры	Луна	Земные аналоги	Марс		Земные аналоги
	Реголит	Пирокластические образования Толбачинского Дола	Реголит	Реголит мёрзлый	Пирокластические образования вулкана Безымянный
Размер зёрен, мм	0,06–2	0,125–1	0,1–5	-	0,125–2
Плотность, г/см ³	0,9–1,2	0,87–1,2	1,0–1,6	-	1,38–1,88
Пористость, %	40–50	41–53	35–65	-	33–67
Теплопроводность, Вт/м·К	1,2–1,7	0,13–0,23	0,1–0,12	2,2–3,2	-
Теплоёмкость, Дж/(м ³ ·К)	0,188	0,87	1,05	0,8–1,1	0,85
Угол внутреннего трения, град.	10–20	20–38	18–41	-	25–45
Сцепление, МПа	0,013–0,03	0–0,03	0–0,0005	0,004	0–0,064
Удельное сопротивление, Ом·м	3,2	10 ⁵ –10 ⁸	-	10 ³ –10 ⁶	10 ⁵ –10 ⁸
Диэлектрическая проницаемость, Ф/м	3,36	-	2,2–2,8	3,25–4	2,2–2,8
Мощность	<20 м	-	<2 км	-	-

3. ТЕМПЕРАТУРА, ДАВЛЕНИЕ, ПЛОТНОСТЬ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ЛЬДОВ

Модификации	Температура, °С	Давление, МПа	Плотность, г/см ²	Диэлектрическая проницаемость
I – гексагональная	0	0,1	0,92	94
Ic – кубическая	-130	0,1	0,93	-
II – тригональная	-35	210	1,18	3,7
III – тетрагональная	-22	200	1,15	117
V – моноклинная	-20	530	1,26	144
VI – тетрагональная	15	1100	1,34	193
VII – кубическая	25	2500	1,65	~150
VIII – кубическая	-50	2500	1,66	~3
IX – тетрагональная	-110	230	1,16	~4

ют космические и не встречаются на Земле. На рисунке представлена фазовая диаграмма состояния воды [20].

Сведения о модификации лунного льда и его свойствах недостаточны, что затрудняет форми-

рование правильных требований к технологии извлечения воды из лунного грунта. Ещё недавно считалось, что Луна – одно из самых сухих мест во всей Солнечной системе. Но затем «попились» сообщения о наличии воды на Луне.

Очевидно, что минимизация массогабаритных характеристик космического технологического оборудования – одна из первостепенных задач. Как установлено экспертной оценкой удельных показателей типового горно-металлургического оборудования, используемого в земных условиях [3], для обеспечения переработки 1 т/ч горной массы на Луне потребуется доставка основного технологического оборудования массой 15–30 т (без учёта материалоёмкости сооружений и вспомогательного оборудования), что эквивалентно затратам на транспортировку в 300–600 млн долл. США.

Необходимы принципиально новые подходы в поиске новых физических принципов при разработке технологий и оборудования. Особый интерес представляют «сухие» технологии, исключающие использование воды. Учитывая незначительную удельную материалоёмкость технологического оборудования [11], может оказаться целесообразным использование энергетических воздействий за счёт электромагнитных полей в целях управления технологическими свойствами минерального сырья [6]. В горном деле уже применяются высокоэнергетические и импульсные электромагнитные технологии [16], которые повышают удельную производительность оборудования рудоподготовки.

При участии авторов статьи проведены постановочные эксперименты по использованию электромагнитных полей в прототипах горных технологий будущего, таких как извлечение воды и бурение. Экспериментально подтверждено, что при воздействии на аналог лунного грунта импульсного электромагнитного поля часть физически связанной воды (до 45%) переходит в свободное состояние [6]. Анализ результатов экспериментов позволяет предполагать, что с применением новой электромагнитной технологии снизится температура выпаривания воды из лунного грунта в 1,5–2,5 раза и увеличится производительность технологического оборудования более чем в два раза по сравнению с американским аналогом роботом-погрузчиком RASSOR Excavator'y.

Экспериментальные тесты нового способа бурения, основанного на ударно-вращательном действии бурового инструмента и действии импульсов магнитного поля, позволили значительно повысить скорость проходки и снизить нагрев

бура за счёт снижения трения в зоне контакта бурового инструмента. Это даст возможность повысить качество разведочного бурения «на воду» на природных космических объектах и снизить удельные показатели материалоёмкости.

Рассмотренная выше проблематика не исчерпывает круг вопросов, требующих решения нестандартными методами. Традиционно при создании более совершенного горно-технологического оборудования конструктор руководствуется известными физико-технологическими процессами и экономически обоснованными критериями оптимизации. При создании космического горно-перерабатывающего оборудования методология может коренным образом поменяться. Во главу угла будут поставлены возможные технические решения в области космической робототехники высокого уровня автономии. Очевидно, что требования к космическим робототехническим комплексам горнодобывающего назначения будут расширены за счёт повышения автономности обслуживания рабочих инструментов комплекса. С другой стороны, размещение робототехнического комплекса на космическом объекте и его деятельность сопряжены с решением ряда практических проблем, связанных с обеспечением энергетикой, обслуживанием, навигацией, развитием искусственного интеллекта, а также созданием условий для непрерывного цикла производства материалов из породы. К сожалению, существующие достижения в области робототехники не позволяют обеспечить полный цикл производства. Таким образом, развитие космической горнодобывающей промышленности может служить драйвером развития космической робототехнической отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ализар А. NASA готово к постройке орбитальной станции для ремонта и заправки спутников. 2015. [Электронный ресурс] URL: <https://geektimes.ru/post/252282/>.
2. Гирина О.А. Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. – Владивосток: Дальнаука, 1998.
3. Городниченко В.И., Дмитриев А.П. Основы горного дела. Учебник для вузов. – М.: Горная книга, 2008.

4. Демидов Н.Э., Базилевский А.Т., Кузьмин Р.О. Грунт Марса: разновидности, структура, состав, физические свойства, буримость и опасности для посадочных аппаратов // *Астрономический вестник*. 2015. Т. 49. № 4. С. 243–261.
5. Инжектор заряженных пылевых частиц / Н.Д.Семкин, А.В.Пияков, К.Е.Воронов и др. // *Приборы и техника эксперимента*. 2006. № 3. С. 154–159.
6. Интенсификация измельчения руд с использованием энергетических воздействий / П.П.Ананьев, Е.Л.Чантурия, Е.С.Томская и др. // *Горный журнал*. 2014. № 12. С. 63–69.
7. *Ксанфомалити* Л.В. Планета Венера. – М.: Наука. 1985.
8. Мосин О.В. Свойства льда и его модификаций. 2012. [Электронный ресурс] URL: <http://www.o8ode.ru/article/krie/ice.htm>.
9. Новые данные о воде на Луне. 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://globalscience.ru/article/read/17335/>.
10. *Передвижение* по грунтам Луны и планет / Под ред. А.Л.Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1986.
11. *Перспективы* развития космической горно-перерабатывающей отрасли / Р.В.Мещеряков, П.П.Ананьев, К.О.Беляков и др. // *Инновации*. 2016. № 4. С. 3–8.
12. РАН и Роскосмос вместе будут исследовать космос и осваивать Луну. Российская Академия Наук. 2015. [Электронный ресурс] URL: <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=98b4812e-0a53-49ff-8130-8dbdd5529a7f>.
13. Сапежинский В.С., Певгов В.Г., Ряховский В.М. О перспективах использования плазменных технологий при переработке техногенного сырья // *Обогащение руд*. 2015. № 6. С. 41–45.
14. Сёмкин Н.Д., Видманов А.С. Модели динамики движения лунной пыли и методы получения потоков заряженных частиц пыли в лабораторных условиях // *Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та*. 2013. С. 164–176.
15. Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта // *Астрономический вестник*. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
16. *Технико-экономические* требования к горным процессам и оборудованию при добыче воды из лунного грунта / П.П.Ананьев, К.О.Беляков, А.В.Плотникова и др. // *Инновации*. 2016. № 9. С. 7–10.
17. *Фундаментальные* космические исследования. Кн. 2. Солнечная система / Под ред. Г.Г.Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
18. Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунтоведение Луны. – М.: Наука, 1979.
19. Черкасов И.И., Шварев В.В., Штейнберг Г.С. Рыхлые вулканические отложения – возможные земные аналоги грунтов Луны // *Космические исследования*. 1969. Вып. 5. № 7. С. 760.
20. *AdmiralHood*. Диаграмма фазового состояния воды. 2010. [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?curid=2234206>.
21. Scott A.N., Oze C., Tang Y., O'Loughlin A. Development of a Martian regolith simulant for in-situ resource utilization testing // *Acta Astronautica*. February 2017. Vol. 131. P. 45–49. [Электронный ресурс] URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.024>.
22. Weiblen P.W., Murawa M.J., Reid K.J. Preparation of stimulants for lunar surface materials / *Engineering, Construction and operation in Space*. 1990. II. P. 428–435.

METHODICAL APPROACHES TO COSMIC MINERAL MATERIAL PROCESSING

P.P.Ananyev, R.V.Meshcheryakov, P.V.Larionov, A.V.Plotnikova, K.O.Belyakov

Development of cosmic processing industry implies mineral mining and processing directly at natural space objects. This will reduce costs on launching of resources needed to ensure operation of a space grouping and development of outer space into near-Earth orbit. The main global trend is related to the increase of water extraction methods at natural space objects in order to obtain low-cost hydrogen fuel and cryogenic components. The paper reviews the problem of synthesizing terrestrial analogs of rocks with properties similar to those of rocks from natural space objects. Prospectiveness of developing «dry» methods to process cosmic minerals is shown.

Keywords: fuel, space, processing, treatment, technology, water, analog samples.